

DIFFUSION BONDING MATERIAL TUNGSTEN-BAJA DENGAN INTERLAYER Ag-4% Cu

Sirod Hantoro, Tiwan

*Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknik
Universitas Negeri Yogyakarta*

ABSTRACT

The objective of this research is to study the implementation diffusion bonding process on tungsten and low carbon steel system with interlayer Ag-4% Cu, as well as investigate the influence of process parameters such as temperatur, initial pressure and heating time to the shear strength of the joint.

Based on the result of shear test, initial pressure 48-144MPa has positive effect to the shear strength. Likewise by improving temperature of heating, it will improve the shear strength. The optimal shear strength is obtained at the temperature 950°C with maximal shear strength is 165 MPa and its bonding ratio 85%. The temperature 950°C and pressure of 144 MPa diffusion bonding has been successfully done with the heating time of 15 minute.

Optical and stereomicroscopy on fracture surface after shear testing of the samples reveal tran granular fracture occur at the interlayer. Microstructure analysis at the interlayer reveals in variation microstructure as function of temperature, initial pressure, and heating time. The thickness of interlayer decrease with increasing the temperature, initial pressure and heating time. Other wise, the thickness of grain boundary and second phase area increase with the increasing the temperature, initial pressure and heating time. Based on the SEM /EDS examination, the element of Fe has the dominant distribution.

There is accumulation of the element Fe on the limit area with tungsten. The distribution of the element of W, Ag and Fe increase with the increasing the heating time. Diffusivity of some atoms has been calculated based on SEM data at the interlayer. At 950°C, the diffusivity among the element of atom namely are $D_{Ag\ to\ Fe} = 0,00195\ \mu m^2 s^{-1}$, $D_{Fe\ to\ Ag} = 0,02364\ \mu m^2 s^{-1}$, $D_{Ag\ to\ W} = 0,0061\ \mu m^2 s^{-1}$, and $D_{W\ to\ Ag} = 0,025034\ \mu m^2 s^{-1}$.

Keywords: Diffusion Bonding, material, Tungsten, steel, interlayer.

1. PENDAHULUAN

Tungsten termasuk bahan logam refraktori yang memiliki temperatur leleh sangat tinggi yaitu mencapai 3410 C°. Kekerasannya mencapai 400 HB, dan memiliki sifat tahan aus yang sangat baik. Oleh karena itu tungsten banyak digunakan sebagai bahan ujung kontak pemutus arus dari elektroda las TIG.

Parameter yang menentukan pembentukan sambungan dalam *diffusion bonding* adalah temperatur, tekanan, waktu, dan kualitas permukaan. Temperatur merupakan parameter terpenting karena berhubungan dengan laju difusi atom. Parameter tekanan akan memberikan deformasi puncak-puncak kekasaran permukaan sehingga akan menempel dengan kuat. Parameter waktu merupakan lamanya kesempatan atom berdifusi. Sedangkan kualitas permukaan berhubungan dengan keterjaminan kontak antar permukaan material yang akan disambung.

Penelitian ini merupakan penerapan proses *diffusion bonding* pada sambungan material tungsten dengan baja, dan menentukan pengaruh parameter temperatur, tekanan, dan waktu terhadap kekuatan geser sambungan.

Tujuan dari penelitian ini adalah mempelajari penerapan *diffusion bonding* pada sambungan material tungsten dengan baja, dan untuk mengetahui pengaruh parameter temperatur, tekanan, dan waktu terhadap tekanan geser sambungan. Keterbatasan penelitian ini tidak melakukan karakterisasi mengenai fasa dan perubahan yang terjadi pada daerah sambungan.

2. LANDASAN TEORI

2.1 Diffusion Bonding

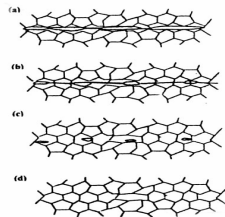
Diffusion bonding merupakan proses penyambungan antara dua material dengan cara pemanasan dan penekanan, tanpa pencairan pada materialnya. Penyambungan yang terjadi karena adanya difusi atom antar material. Penekanan untuk memberikan kontak dalam jarak interatomik sehingga difusi atom antara material dapat terjadi lebih mudah.

Karakteristik penyambungan dengan proses *diffusion bonding* adalah sebagai berikut: 1). Sambungan terjadi pada temperatur dibawah titik cair material yaitu $0,5 - 0,8 T_m$, 2) Penyatuan antar permukaan kontak dihasilkan dengan memberikan beban yang kecil sehingga tidak terjadi deformasi plastis yang berlebihan. 3). Lapisan antar dapat diberikan untuk membantu meningkatkan aktivitas pembentukan sambungan dalam proses bonding[2].

2.2 Mekanisme Diffusion bonding

Dalam *diffusion bonding* proses penyambungan pada dasarnya merupakan penggabungan dua permukaan material padat secara atomic. Penyatuan permukaan terjadi karena adanya proses difusi atom antar permukaan material. Adapun mekanisme penyatuan permukaan secara lengkap dijelaskan dalam gambar.1

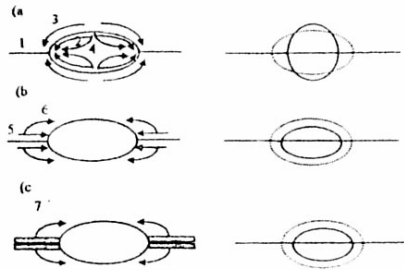
Mekanisme penyambungan dapat dibagi menjadi 3 tahap. Setiap tahapan tidak berlangsung secara terpisah tetapi mulai dan berakhir secara berkesinambungan, sehingga mekanisme metalurginya saling melengkapi. Setiap tahap mempunyai kontribusi yang sama pentingnya selama proses penyambungan



Gambar 1. Tahapan metalurgi *diffusion bonding* [6]

Pada tahap pertama, faktor kekasaran permukaan dan tekanan mempunyai peranan yang penting. Permukaan benda kerja yang sebenarnya tidak pernah betul-betul halus dan rata. Sehingga pada daerah kontak antar permukaan logam akan membentuk rongga-rongga akan berkurang karena pada ujung kekasarannya terdeformasi. Secara ideal tahap pertama berjalan penuh, bila menghasilkan hilangnya puncak kekasaran dan penyebaran void yang merata pada daerah kontak.

Pada tahap kedua, *diffusion bonding* terjadi pengurangan rongga-rongga pada permukaan kontak. Pengurangan rongga-rongga ini dikarenakan adanya proses perpindahan masa menuju rongga yang mengakibatkan ukuran rongga berubah mengecil. Dalam *diffusion bonding* proses perpindahan masa berlangsung secara bersamaan berupa aliran plastis, difusi dari *interface* menuju rongga melalui *lattice*, *interface* dan *grain boundary*..



Gambar 2. Skema bagian dari transfer material selama proses *diffusion bonding* [6]

Lebih jelasnya bagian dari transfer massa dapat dilihat pada gambar.2 yang meliputi: peluluhan plastis yang mendeformasi ujung kontak permukaan, difusi *surface* dari permukaan menuju leher, difusi volume dari permukaan ke leher, penguapan dari permukaan mengembun pada leher, difusi *grain boundary* dari antar muka menuju leher, difusi volume dari antar muka menuju leher, *power law creep*

Pada tahap ketiga, bagian difusi yang dominan adalah difusi volume. Selama tahap ini rongga-rongga menyusut hingga menjadi sangat kecil dan akhirnya hilang. Batas butir bergerak menuju sebuah bentuk kesetimbangan, hingga menyatu dan tidak dapat dibedakan dari *grain boundary* lainnya, secara struktur mikro. Bidang kontak permukaan awal berubah karena adanya penetrasi lokal difusi atom.. Tahap tiga berlanjut secara sempurna dengan hilangnya rongga-rongga hingga menyatunya permukaan kedua material yang disambung.

2.3 Diffusion Bonding dengan Bantuan Interlayer

Dalam proses *diffusion bonding* dapat dilakukan dengan menambahkan lapisan antara (*interlayer*) pada permukaan kontak material yang disambung. Penambahan *interlayer* ini bertujuan untuk membantu meningkatkan aktivitas proses difusi pada material yang disambung. Dalam hal ini biasanya dipilih *interlayer* dari material yang memiliki kelarutan yang baik pada material yang disambung.

Interlayer dapat pula dipilih dari material yang dapat menangkap unsur kotoran pada interface dan menghasilkan permukaan yang bersih. Untuk tujuan tersebut material yang dipilih adalah material yang memiliki solusibilitas yang tinggi yang mengandung unsur interstisi. Pada *interlayer* dapat juga menggunakan material lunak dengan tujuan memaksimalkan bidang kontak selama tahap pertama bonding. Material yang sering digunakan sebagai interlayer seperti tembaga, perak dan nikel.

Ketebalan lapisan *interlayer* akan mempengaruhi kekuatan mekanis dari sambungan. Untuk mendapatkan kekuatan mekanis sambungan *diffusion bonding* yang maksimal, maka lapisan *interlayer* harus tipis. Sambungan dengan *interlayer* yang tebal, tegangan tarik secara langsung berhubungan dengan sifat bulk dari material *interlayer*. Sedangkan dengan interlayer yang relatif tipis, kekuatan tarik sambungan meningkat, karena material matrik meregang pada aliran plastis kontak interface yang berinteraksi dengan logam induk. Studi eksperimen yang telah dilakukan menunjukkan untuk memperoleh kekuatan interface yang maksimum, disarankan ketebalan interlayer kurang lebih 0,025 mm [6].

2.4 Variabel Diffusion Bonding

Banyak variabel yang berpengaruh terhadap hasil *diffusion bonding*. Variabel ini meliputi kondisi lingkungan, proses, kondisi permukaan material, tekanan bonding, dan lamanya pemanasan. *Diffusion bonding* dapat dilakukan pada lingkungan yang dilindungi dengan suatu gas pelindung seperti gas argon. Lebih baik lagi *diffusion bonding* dilakukan pada lingkungan vakum yang bertekanan 10^{-1} - 10^{-3} Pa [4].

2.5 Kelebihan dan Kekurangan Diffusion Bonding

a. Kelebihan

Sambungan yang dihasilkan memiliki sifat-sifat dan struktur mikro yang Sama dengan logam induknya. Komponen yang disambung mengalami distorsi minimum dan tidak memerlukan proses permesinan atau pembentukan lagi. Dapat menyambung dua material yang berbeda yang tidak dapat disambung dengan proses fusi. Beberapa sambungan pada suatu struktur dapat dilakukan secara serentak. Dapat menyambung pada tempat atau bagian yang sulit. Dapat menyambung komponen besar tanpa proses *preheat*. Cacat yang biasa terdapat dalam fasion welding tidak ditemukan

b. Kekurangan

Pada umumnya memerlukan durasi siklus yang lebih panjang, biaya peralatan mahal sehingga mempengaruhi nilai ekonomisnya, memerlukan lingkungan khusus yang terlindung dari proses oksidasi, karena proses difusi sangat sensitive terhadap oksidasi, teknik pemeriksaan yang tidak merusak belum tersedia, khususnya yang menjamin sifat-sifat rancangan pada sambungan, *interlayer* dan produser yang sesuai belum dikembangkan untuk semua struktur paduan, permukaan yang disambung atau diperbaiki memerlukan persiapan yang lebih rumit, kebutuhan penerapan panas dan gaya tekan yang tinggi secara serentak dalam lingkungan vakum merupakan masalah peralatan utama pada *diffusion bonding*.

2.6 Mekanisme Difusi

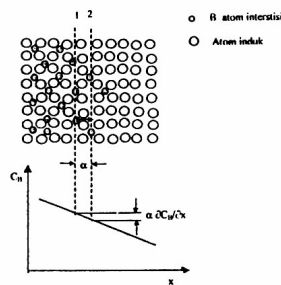
Proses penting yang mengontrol terjadinya transfer massa pada material adalah difusi atom. Ada dua bentuk mekanisme difusi atom dalam fasa padat. Mekanismenya tergantung pada tipe tempat yang tersedia dalam sel satuan. Mekanisme tersebut yaitu interstisi dan substitusi.

1. Difusi interstisi

Difusi interstisi terjadi apabila ukuran atom yang berpindah memiliki ukuran yang jauh lebih kecil dari atom induknya. Untuk lebih jelasnya kita tinjau model sederhana bahwa atom B terlarut sempurna tanpa menyebabkan distorsi pada lattice induk. Diasumsikan larutan sangat baik dan setiap atom interstisi dikelilingi oleh enam tempat interstisi kosong. Konsentrasi B bervariasi sepanjang x (lihat gambar .3)

Kita lihat pertukaran atom antara bidang 1 dan 2. Dimisalkan lompatan rata-rata atom interstisi adalah Γ_B kali per detik. Dan setiap lompatan arahnya sembarang. Jika bidang 1 berisi n_1 B atom per m^2 , jumlah atom yang dapat melompat dari bidang 1 ke 2 dalam 1 detik (J_{B1}) adalah:

$$J_{B1} = 1/6 \Gamma_B n_1 \text{ (atom / m}^2 \text{ s)} \quad (1)$$



Gambar 3. Difusi interstisi dengan lompatan random [8]

Demikian juga sebaliknya dalam waktu singkat jumlah atom yang melompat dari bidang 2 ke 1, dengan asumsi Γ_B tidak tergantung konsentrasi, adalah:

$$J_{B2} = 1/6 \Gamma_B n_2 \text{ atom/ m}^2 \text{ s} \quad (2)$$

Karena $n_1 > n_2$, maka flux netto atom berjalan dari kiri ke kanan yaitu:

$$J_B = J_{B1} - J_{B2} = 1/6 \Gamma_B (n_1 - n_2) \quad (3)$$

Jika jarak dari bidang 1 dan 2 adalah α , konsentrasi B pada bidang I $C_{B1} = n_1 / \alpha$ atom/ m^3 dan $C_{B2} = n_2 / \alpha$. Maka $(n_1 - n_2) = \alpha (C_{B1} - C_{B2})$. Dari gambar .3 dapat dilihat bahwa $(C_{B1} - C_{B2}) = -\alpha (\delta C_B / \delta x)$. Dengan mensubstitusikan persamaan ini pada persamaan 3 diperoleh:

$$J_B = - \left[\frac{1}{6} \Gamma_B \alpha^2 \right] \frac{\partial C_n}{\partial x} \text{ atom m}^{-2} \text{ s}^{-1} \quad (4)$$

Turunan parsial $\delta C_B / \delta x$ digunakan untuk mengindikasikan bahwa gradien konsentrasi dapat berubah dengan waktu. Dengan mensubstitusikan:

$$D_B = \frac{1}{6} \Gamma_B \alpha^2 \quad (5)$$

Sehingga diperoleh

$$J_B = - D_B \frac{\partial C_n}{\partial x} \quad (6)$$

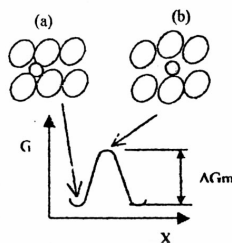
Persamaan 6 sering dikenal sebagai Hukum Fick 1. yang dikemukakan oleh Fick pada tahun 1855. D_B disebut sebagai *diffusivity* atau koefisien difusi dari B, dan satuannya (m^2s^{-1}). Satuan flux adalah (jumlah $\text{m}^{-2}\text{s}^{-2}$) dan untuk $\delta C_B / \delta x$ (jumlah m^{-4}), dimana satuan jumlah dapat dalam bentuk atom, mole, kg, dan sebagainya [8].

2. Pengaruh temperatur- aktivasi termal

Pada fase padat atom akan bergetar disekitar posisinya karena adanya energi termal. Energi termal ini muncul karena kenaikan tempertur. Getaran atom akan meningkat dengan meningkatnya temperatur. Pada suatu saat akibat getaran yang hebat, akan menmghasilkan lompatan atom. Sedangkan frekuensi lompatan (Γ) ini berhubungan erat dengan koefisien difusi.

Atom intertisi pada posisi diam yaitu pada posisi energi potensial minimum. Agar gerakan atom intertisi mampu mendorong atom sekitarnya (gambar .4), maka kerja yang dilakukan harus sebesar usaha yang menyebabkan naiknya energi bebas pada sistem sebesar ΔG_m . Dimana ΔG_m dikenal sebagai energi aktivasi untuk pergerakan atom intertisi. Jika atom intertisi bervibrasi dengan frekuensi rata o dalam arah x, itu berarti usaha perdetiknya untuk menuju tempat yang lain yaitu sebesar $\exp (\Delta G_m / RT)$. Atom secara random bervibrasi dalam arah tiga dimensi, dan jika disekitar ada tempat melompat sebanyak z, maka frekuensi lompatan adalah:

$$\Gamma_B = z v \exp \frac{-\Delta G_m}{RT} \quad (7)$$



Gambar 4. Perbedaan energi bebas sebagai fungsi posisi interstisi pada lattice [8]

ΔG_m merupakan jumlah aktivasi entalpi (ΔH_m) dan bentuk aktivasi entropy ($-T\Delta S_m$).

Dengan menggabungkan persamaan 5 dan 7 akan diperoleh koefisien difusi sebagai berikut:

$$D_B = \left[\frac{1}{6} \alpha^2 z v \exp \frac{\Delta S_m}{R} \right] \exp \frac{-\Delta H_m}{RT} \quad (8)$$

Ini dapat disederhanakan sebagai persamaan tipe Arrhenius, yaitu:

$$D_B = D_{B0} \exp \frac{-Q_{LD}}{RT} \quad (9)$$

dimana,

$$D_{B0} = \frac{1}{6} \alpha^2 z v \exp \frac{\Delta S_m}{R} \quad (10)$$

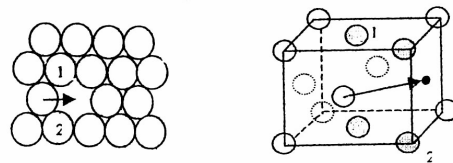
dan

$$Q_{LD} = \Delta H_m \quad (11)$$

Bentuk yang tidak pada temperatur dikelompokkan menjadi konstanta material tunggal yaitu D_{B0} atau D meningkat secara eksponensial dengan temperatur pada laju yang ditentukan oleh aktivasi entalpi Q_{LD} .

3. Difusi Substitusi

Difusi substitusi terjadi apabila atom yang berpindah memiliki ukuran yang relatif sama dengan atom induknya. Atom substitusi dapat berpindah jika disekitarnya terdapat kekosongan dan energi vibrasi atom mencukupi untuk melewati energi hambatan atom tetangga. Energi vibrasi setiap atom meningkat secara proporsional dengan temperatur, dan meningkat dengan meningkatnya amplitudo osilasi



Gambar 5. Perpindahan atom menuju vakansi dalam *lattice* [8]

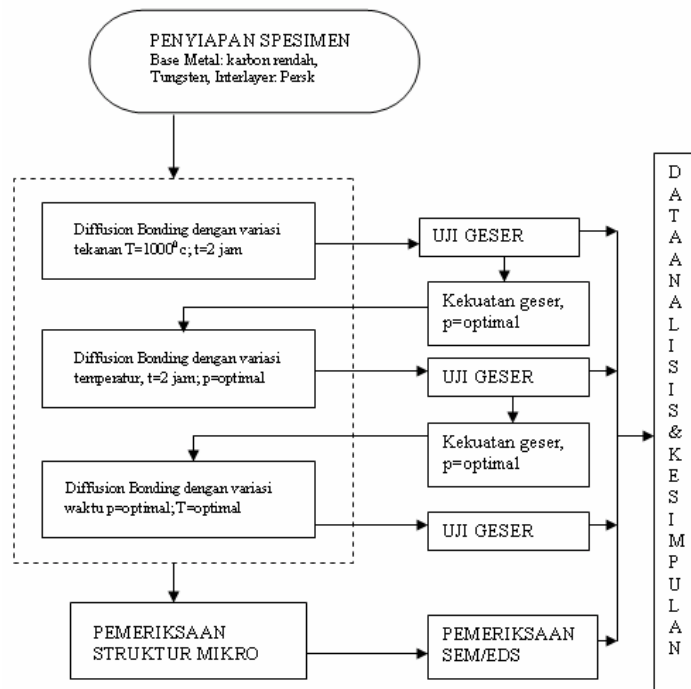
Gerakan atom substitusi ketempat kosong dirintangi oleh atom sekitarnya (gambar .5). Agar terjadi lompatan, atom harus bergerak menciptakan celah yang cukup agar atom dapat bergerak diantaranya. Kemungkinan semua atom dapat

melompat menuju tempat vakansi tergantung pada kemungkinan ia dapat menyediakan energi vibrasi yang cukup. Dalam difusi substitusi terjadi dua kemungkinan yaitu perpindahan atom itu sendiri menuju vakansi yang disebut dengan self-difusi dan perpindahan vakansi menggantikan tempat atom yang pindah disebut difusi vakansi.

3. METODE PENELITIAN

a. Diagram alir penelitian

Langkah-langkah penelitian ditunjukkan pada Gambar 6.

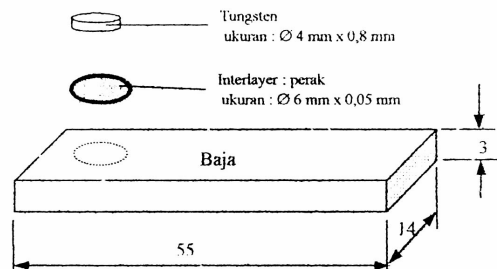


Gambar 6. Bagan alir percobaan

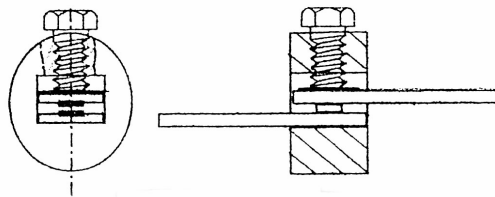
b. Pelaksanaan Penelitian

1. Menyiapkan spesimen dengan ukuran panjang x lebar x tinggi (55 x 14 x 3 mm), kemudian tungsten, interlayer dari perak, gosok semua permukaan dengan tingkat kehalusan 1000.
2. Pelaksanaan **diffusion bonding** yaitu: membersihkan semua permukaan, jepit material dengan klem, letakan spesimen dalam tabung dengan pelindung gas argon, panaskan dalam tungku tahanan listrik dengan aliran gas argon 4 ml/ dt dengan temperatur tertentu. Setelah selesai dinginkan dalam tungku hingga mencapai suhu kamar.

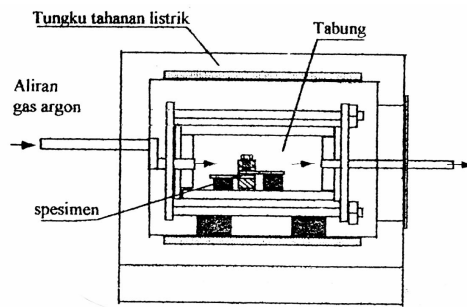
3. Uji geser dilakukan pada mesin uji tarik instron, untuk menguji kekuatan sambungan
4. Pengamatan struktur mikro dilakukan pada daerah sambungan dengan menggunakan mikroskop optik omnimet
5. Pemeriksaan komposisi difusi di daerah sambungan menggunakan SEM/ EDS.



Gambar 7. Bahan spesimen untuk *diffusion bonding*



Gambar 8. Cara penekanan spesimen *diffusion bonding*



Gambar 9. Cara pemanasan dalam proses *diffusion bonding*

4. HASIL PENELITIAN DAN PEMBAHASAN

a. Hasil pelaksanaan *diffusion bonding*

Diffusion bonding antara material baja dan tungsten dilakukan dengan menggunakan interlayer perak. Perak memiliki sifat lunak, mudah dideformasi, suhu leleh rendah dan mobilitas atomnya tinggi. Pada penelitian ini *interlayer* yang digunakan adalah perak (Ag, 4%Cu) dalam bentuk *foil* dengan ketebalan 0,05 mm.

Diffusion bonding pada penelitian ini dilaksanakan pada temperatur 800-1000°C dengan tekanan 48-244 Mpa dan lama pemanasan 15-120 detik. Pemanasan dilakukan dalam tungku tahanan listrik. Selama proses pemanasan dilakukan dalam tungku tahanan listrik.

b. Kekuatan geser *diffusion bonding*

Kekuatan geser yang diperoleh bervariasi antara 13–165 Mpa. Hasil kekuatan geser *diffusion bonding* selengkapnya dapat dilihat pada Tabel .1

Tabel 1. Kekuatan geser *diffusion bonding* baja-tungsten dengan *Interlayer* perak

| <i>Spes.No</i> | <i>Tek. awal (MPa)</i> | <i>Temperatur (C)</i> | <i>Holding time</i> | <i>Kekuatan geser (MPa)</i> |
|----------------|------------------------|-----------------------|---------------------|-----------------------------|
| 1 | 48 | 1000 | 120 | 43,02 |
| 2 | 96 | 1000 | 120 | 115,24 |
| 3 | 144 | 1000 | 120 | 124,55 |
| 4 | 192 | 1000 | 120 | 64,09 |
| 5 | 240 | 1000 | 120 | 61,09 |
| 6 | 144 | 800 | 120 | - |
| 7 | 144 | 850 | 120 | 13,42 |
| 8 | 144 | 900 | 120 | 55,07 |
| 9 | 144 | 950 | 120 | 165,42 |
| 10 | 144 | 950 | 90 | 78,79 |
| 11 | 144 | 950 | 60 | 122,50 |
| 12 | 144 | 950 | 30 | 59,21 |
| 13 | 144 | 950 | 15 | 85,45 |

Tabel 2. Sebaran komposisi unsur pada *diffusion bonding*

| Posisi | Komponen dalam % berat | | | | |
|--------|------------------------|------|-------|-------|------|
| | W | S | Ag | Fe | Ni |
| -4 | 96,99 | - | 0,39 | 0,82 | 1,8 |
| -3 | 87,39 | - | - | 9,20 | 3,4 |
| -2 | 71,45 | - | 5,63 | 18,14 | 4,79 |
| -1 | 7,30 | - | 35,81 | 56,51 | 0,38 |
| 0 | - | - | 79,72 | 20,28 | - |
| 1 | - | - | 89,11 | 10,71 | 019 |
| 2 | 2,03 | 0,23 | 0,73 | 97,01 | - |
| 3 | 0,40 | 0,07 | 0,40 | 99,13 | - |
| 4 | 0,12 | 0,12 | 0,11 | 99,67 | - |

Catatan: T = 950 °C, P= 144Mpa, t =15 menit

Bonding ratio dihitung dengan cara mengukur panjang total dan panjang cacat di beberapa titik amatan di daerah sambungan dengan mikroskop. Adapun hasilnya adalah sebagai berikut dalam tabel dibawah ini.

Tabel 3. Bonding ratio sabungan *diffusion bonding*

| Tekanan (MPa) | Temperatur (°C) | Holding time (menit) | Kekeuatan geser (MPa) | Bonding ratio (%) |
|------------------|--------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| 144 | 1000 | 120 | 124,55 | 64,7 |
| 144 | 950 | 120 | 165,42 | 85,0 |
| 144 | 950 | 60 | 122,50 | 57,3 |

5. SIMPULAN

Penyambungan material tungsten-baja karbon rendah dapat dilakukan dengan proses *diffusion bonding* dengan interlayer perak, pemanas tungku tahanan listrik yang dialiri gas argon dengan laju 4 mm/ dt. Kekuatan optimal dicapai pada suhu 950°C, tekan 144 MPa, lama waktu 15 menit, kekuatan gesernya antara 85-165 MPa. Semakin lama waktu pemanasan akan meningkatkan kekuatan geser sambungan, karena jumlah atom yang berdifusi semakin banyak sehingga proses penyatuan permukaan kontak lebih baik.

Perlu adanya penelitian *diffusion bonding* dengan melakukan karakteristik fasa getas menggunakan teknik Elektron Difraksi, melakukan *diffusion bonding* tungsten- baja pada ruang vakum, melakukan penelitian *diffusion bonding* tungsten- baja dengan menerapkan perak dalam bentuk coating atau serbuk.

PUSTAKA

- [1] Daniel K. W. Wall Colmonoy Corporation (1995) *Diffusion Brazing*, AMS Handbook, Vol. 6.
- [2] Dunkerton, S. B. (1995) *Procedure Development and Practice Consideration for Diffusion Welding*, ASM Handbook, Vol. 6.
- [3] Kalpakjian, S. (1985) *Manufacturing Engineering and Technology*, Addison-Wesley, New Jersey.

- [4] Kazakov, N. F. (1985) *Diffusion Bonding of Materials*, Mir Publisher, Moscow . .
- [5] Lu, L., Lai, M. O., dan Zhang, S. (1997) Diffusion in Mechanical Alloying,
Jurnal of Material Processing Technology, No. 67.
- [6] Mahoney, M. W., dan Bamton, C. C. (1995) *Fundamentals of Diffusion Bonding*,
AMS Handbook, Vol. 6.
- [7] Nguyenttat, T. (1994) *Diffusion Bonding: An Advanced Material Process for
Aerospace Technology*, Aerojeet Sacramento, California.
- [8] Porter, D. A., dan Easterling, K. E. (1998) *Phase Transformations in Metals and
Alloys*, VNR International, London.